

危机矿山深边部找矿地球物理方法与应用研究^{*}

敬荣中，曾高福，黄理善，曾 晖

(桂林矿产地质研究院，广西 桂林 541004)

摘 要：根据广西珊瑚钨锡矿、栗木锡矿及大厂锡矿几个大型危机矿山深边部找矿不同地球物理方法应用中成功的实例，为大型有色金属矿山深边部找矿提供了区分矿与非矿地球物理异常特征示范，也为危机矿山深边部找矿提供了立体找矿方法示范。

关键词：危机矿山；深边部找矿；地球物理方法

中图分类号：P631.8 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-0308 (2011) S2-0068-05

Applications and Researches of Geophysical Methods for Deep and External Ore Body Prospecting in Crisis Mine

JING Rong-zhong, ZENG Gao-fu, HUANG Li-shan, ZENG Hui

(Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources, Guilin, Guangxi 541004, China)

ABSTRACT: According to integrated geophysical methods successfully applied in Shanhu Wolfram-Tin Deposit, Limu Tin Deposit and Dachang Tin Deposit, this paper demonstrated how to distinguish mineral geophysical anomalies from non-mineral geophysical anomalies and gave demonstration of 3D geophysical exploration technology for deep and external ore bodies prospecting in nonferrous metals mine and crisis Mine.

KEY WORDS: crisis mine; deep and external ore body exploration; geophysical method

随着老矿山找矿难度和探测深度的不断增大，原有的物探方法和物探仪器设备已经不能满足老矿山新一轮找矿的需要，除了探测深度问题，物探方法技术的综合应用、数据处理和解释软件等都不完善，特别是缺少大深度的电法勘探技术和电法解释软件。为了解决老矿山新一轮找矿问题，有必要研究行之有效的勘探方法技术，建立物探深部（500~1 500 m）及外围找矿勘查技术创新体系，为解决我国有色金属大型矿山接替资源和可持续发展提供技术支持。

1 危机矿山深边部找矿的地球物理方法

1.1 可控源音频大地电磁法（CSAMT）

CSAMT 法是 20 世纪 80 年代末才兴起的一种地球物理新技术，它基于电磁波传播理论和麦克斯

韦方程组。麦克斯韦方程组实质上是反映了电荷、电流、电场、磁场随时间和空间变化规律的定律，综合了电磁现象的相互作用。

根据麦克斯韦方程组，假定在均匀介质中，令初始状态介质内不带电荷，则可得到实用的简谐振荡时均匀介质中地下的卡尼亚电阻率（ ρ_s ）公式为：

$$\rho_s = \frac{|E_x|^2}{5f|B_y|^2} \quad (1)$$

式中： f 为频率（Hz）， E_x 为沿 x 方向的电场， B_y 为沿 y 方向的磁场。

又根据电磁波的趋肤效应理论，结合非均匀介质和均匀分层介质的情况，其有效穿透深度范围可估算为：

^{*} 收稿日期：2011-06-01

作者简介：敬荣中（1965-），男，湖南邵阳人，教授级高级工程师，博士，主要从事地球探测与信息技术、物探数据处理研究。

$$H \approx (356 \sim 503) \sqrt{\rho/f} \quad (2)$$

式中: H 为有效穿透深度或探测深度, m; ρ 为介质的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

1.2 高频大地电磁法 (EH-4)

EH-4 是由美国 EMI 公司和 Geometrics 公司联合推出的新一代电磁观测系统,能观测到离地表几米至 1 500 m 内的地质断面的电性变化信息。基于对断面电性信息的分析研究,可以确定地电断面的性质。该系统适用于各种不同的地质条件和比较恶劣的野外环境,常用于矿产与地热勘察、环境监测以及工程地质调查等。其工作原理与大地电磁 (MT) 法一样,是利用宇宙中的太阳风、雷电等入射到地球上的天然电磁场信号作为激发场源,又称为一次场,该一次场是平面电磁波,垂直入射到大地介质中。由电磁场理论可知,大地介质中将产生感应电磁场,则此感应电磁场与一次场是同频率的。

在电磁理论中,把电磁场 (E 、 H) 在大地中传播时,其振幅衰减到初始 $1/e$ 时的深度,定义为穿透深度或趋肤深度 (δ):

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3)$$

由上式可知, 趋肤深度 (δ) 将随电阻率 (ρ) 和频率 (f) 的变化而变化, 测量是在和地下研究深度相对应的频带上进行的。一般来说, 频率较高的数据反映浅部的电性特征, 频率较低的数据反映较深的地层特征。因此, 在一个宽频带上观测电场和磁场信息, 并由此计算出电阻率和相位, 可确定出地下地电断面的电性特征和地下构造, 这就是 EH-4 观测系统的方法原理。

野外采集的时间序列的数据进行预处理后,再现场进行 FFT 变换,获得电场和磁场虚实分量和相位数据,并现场进行一维 BOSTIC 反演。在一维反演的基础上,利用 EH-4 系统的二维成像软件进行快速自动二维电磁成像。为了提高分辨率,二维电磁成像的系数选为 0.5,同时选择较小的像素,使反演数据得到加密,从而突出相对微弱低阻异常。对反演得到的数据在 XZ 平面上进行 Kringing 网格化,X 轴和 Y 轴采用各向异性的方法进行半径搜索,从而满足电性各向异性的实际情况。

1.3 地下物探方法

1.3.1 电法综合测井

钻孔地球物理探测俗称测井。井中电法勘探的物理基础理论与地面电法勘探的相同，具体工作

时,按照供电电极和测量电极的布置方法的不同,而分为激电测井法与井中电法,统称电法综合测井。

1.3.2 激电测井

激发极化测井简称激电测井，主要是提供钻孔剖面激发极化特征，以确定岩层界面及判断井旁盲矿。因此，根据激发极化测井资料可以校正钻孔地质剖面，确定被钻孔穿过的矿层的深度和厚度，探测井旁盲矿体，为地面物探和井中物探的资料解释提供岩（矿）石的电阻率和极化率参数。激电测井常采用梯度电极系（参见图1）。

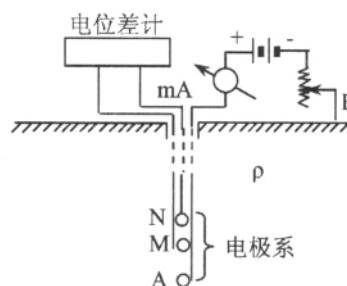


图1 激电测井装置示意图

1.3.3 井中电法

井中激发极化法是人们所熟悉的方法（参见图2）。它对探查浸染状矿体和矿化带颇有成效。根据地质勘查任务的不同，所选取的工作方式也不同。井中激电工作大多采用地面供电—井中测量的地—井方式。地—井方式的特点是在于它利用钻孔而使测量电极接近矿体以致使矿体的异常响应加大。为确定井旁盲矿体相对于钻孔的方位，地—井方式中通常采用方位测量，其实质是由于地表供电电极 A （ B 极在无穷远）方位的改变，对井旁盲矿体的极化方向亦改变。如在钻孔 O （参见图3）的四个方位上分别布置点电极 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 （ B 极在无穷远），沿井身 OO' 观测，图中井旁 A_2 的激发最强， A_4 的激发最弱， A_1 、 A_3 的激发程度介于 A_2 和 A_4 之间，所以，在 I 号矿体对应的深度上， A_2 供电测得最大视幅频率 F_s 异常； A_4 供电测得的异常最弱； A_1 、 A_3 供电的异常介于 A_2 和 A_4 之间，图中井底 II 号矿体由于受 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 供电的激发程度相当，所以，在终孔深度 O' 附近，各方位供电测得视极化率的异常形态和大小一致，并自上而下逐渐向负值增大。

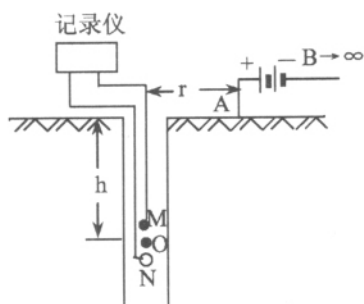


图 2 井中激电装置示意图

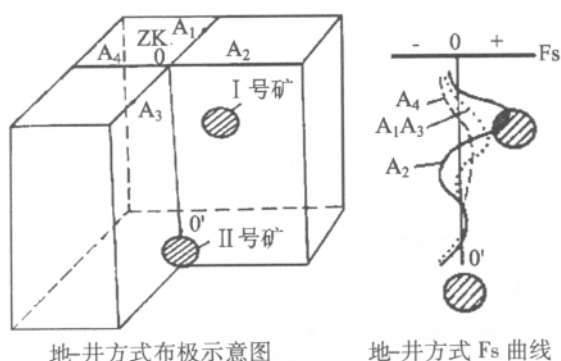


图 3 地-井方式原理图

根据地—井方式观测结果，分析不同深度各方位的异常差异和特征，便可发现井旁和井底盲矿体，并指示井旁矿体的方位和深度。通过分析各方位 A 极供电的电阻率曲线，可以发现井旁或井底与围岩电阻率有明显差异的矿体或构造。

2 方法应用与效果

2.1 珊瑚钨锡矿可控源音频大地电磁法 (CSAMT)

珊瑚钨锡矿以钨锡石英脉型、钨铋萤石石英脉型、含钨石英角砾脉型和似层状锡多金属硫化物型为主。图 4 为测区 11 线综合剖面图，上图为地质剖面图，下图为 CSAMT 二维反演电阻率断面图。

该剖面出露的断层有 F_1 。CSAMT 电阻率断面图正好在 F_1 相应位置处出现明显电性横向梯度带，对应关系较好。

由地质剖面图可见，在 62 ~ 52 号测点、标高 300 ~ -300 m 之间矿脉密集（地质剖面图中红色线条所示），矿脉向小号测点方向（东南方向）倾斜。CSAMT 电阻率断面图正好在相应位置出现非常明显的低阻异常，异常特征基本反映了矿脉的特征，且均指示向小号测点方向（东南方向）倾斜，但该异常区域范围比已知矿脉大，依此推测矿脉组继续往小号测点方向（东南方向）延伸。

CSAMT 电阻率断面图在剖面 57 号测点附近存在电性横向梯度带，推测为断层 FT_1 ，向小号测点方向（东南方向）倾斜。CSAMT 电阻率断面图在 98 ~ 88 号测点、-500 ~ -900 m 之间有一明显低阻异常，异常未圈闭，推测该异常为矿致异常，该区域为成矿有利地段。根据 CSAMT 电阻率断面图电性纵向分布规律，推测岩体顶界面标高在 -1 100 ~ -1 350 m 范围内。

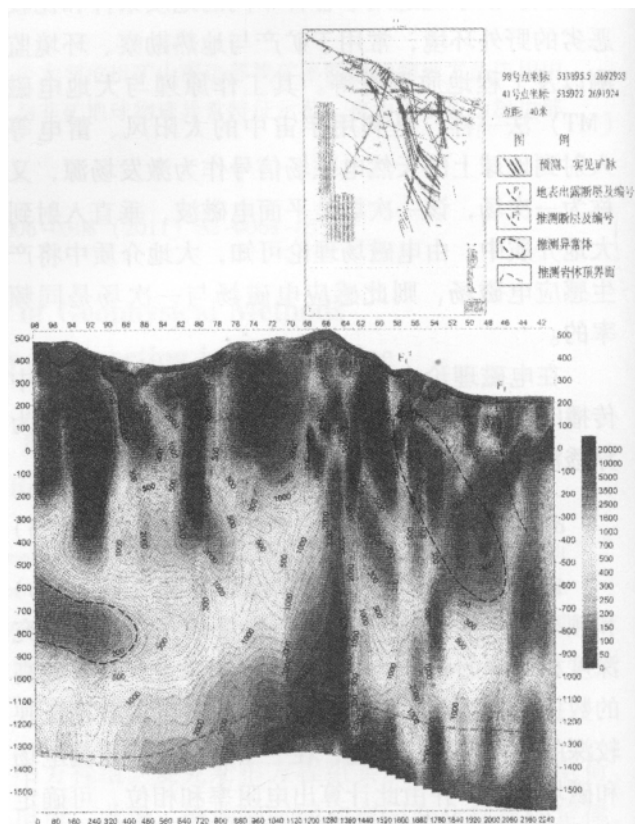


图 4 11 线综合剖面图

对珊瑚矿区而言，CSAMT 测量结果与已知地质资料吻合较好：CSAMT 电阻率断面图在各断层相应位置出现电性横向梯度带；已知矿脉（组）在 CSAMT 电阻率断面图上表现出明显的低阻异常特征，异常特征很好地反映了矿脉的特征，均指示向小号测点方向（东南方向）倾斜。因此，CSAMT 测量结果能较准确地反映本矿区构造、矿脉（组）、岩体（顶界面）、围岩等的空间展布特征。

2.2 栗木锡矿高频大地电磁法 (EH-4)

栗木锡钨铋矿床位于南岭东西向构造带中段，是我国著名的南岭有色和稀有金属成矿带的重要组成部分。其钠长石花岗岩隆起外侧及向外突出或呈岩钟状突起是钨铋、锡矿体赋存部位。图 5 为矿区 C 线综

合剖面图,上图为地质剖面图,下图为高频大地电磁法(EH-4)二维反演电阻率断面图。

整体上,该剖面电阻率值呈现出“上低下高,南低北高”的特点。在剖面500~1 640 m、标高-100 m左右以下为高阻,其上部电阻率等值线走势与岩体顶界面起伏(如图中所示)情况基本一致。在剖面12号测点附近,有一明显的横向电性梯度带,推测为未知断层 F_{11} 。 F_{11} 向南(小号测点方向)倾斜,倾角较陡,延深至标高-800 m以下,延深很大。剖面在纵向上夹有两条较明显的低阻带(图中推断的异常体1和异常体2),推测是不同期次花岗岩中间存在的低阻夹层。

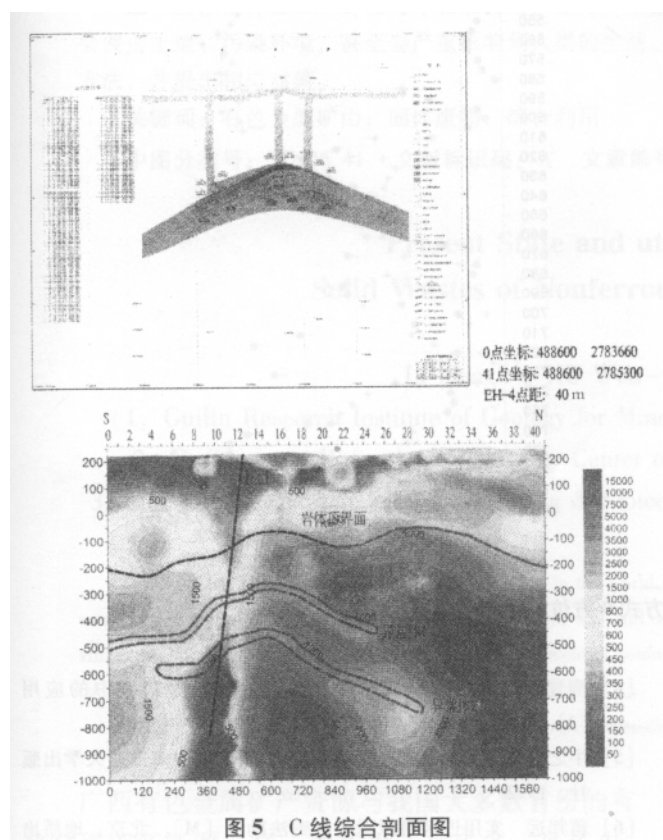


图5 C线综合剖面图

通过对比发现,C剖面高频大地电磁法(EH-4)测量结果与已知的地质信息非常吻合。另外,推断断裂构造 F_{11} 已得到地质验证。同时从物探剖面异常分析,本矿区花岗岩体可能存在不同期次,不同期次间有可能存在夹层富矿体。

在栗木矿区,各剖面已知地质信息和高频大地电磁法(EH-4)测量结果有较好的对应关系,说明高频大地电磁法(EH-4)能较准确地反映本矿区构造、岩体(顶界面)、围岩(砂岩、大理岩、泥质灰岩或碳质灰岩等)等的空间展布特征。

2.3 大厂矿区黑水沟一大树脚锌铜矿区 ZK1501 综合测井

桂林矿产地质研究院在黑水沟一大树脚锌铜矿区开展了一系列综合测井工作,图6为ZK1501孔测井结果,图6-a为激电测井的 ρ_s 和 F_s 曲线图、b为0方位测井的 ρ_s 和 F_s 曲线图。

1) 激电测井 从图6-a中可以看出,500 m以上为高阻—低极化地段,500~580 m为较高阻—较高极化地段,580 m以下至井底为低阻—高极化地段。因此,推断500~580 m为零星浸染矿化灰岩层,而580 m以下至井底可能为测区内含矿岩层,含碳质、硫等较高,且为页岩和泥灰岩互层,从而引起低阻—高极化物探异常特征。值得注意的是,井底出现“张口”异常,可能在靠近井底或井底附近有矿化较好的矿化岩层。

2) 地—井方式井中激电 主要异常地段位于580 m以下,但580~600 m有一 ρ_s 较高、 F_s 也较高即高阻—高极化异常段,推测此井段为浸染矿化岩层;600 m以下为低阻异常地段, ρ_s 均小于1 000 $\Omega \cdot m$,而呈锯齿状,显示矿化非常不均匀,推断为含碳质、矿化普遍并且局部较富集但矿化极不均匀的含矿岩层,与电测井结果相对应。同样,在井底760~780 m为低阻—高极化的“张口”(即未封闭)异常,推测在井底附近可能存在较大规模的富矿体。

提交报告后,215队在ZK1501孔的西边及北边布置了更深的钻孔,结果都见到了厚大的富矿体,与原测井结果非常吻合。

3 结 语

1) 老矿区找矿难度越来越大,因此必须在成矿理论、矿体模式及找矿模式等方面有创新。

2) 新技术、新方法的应用。

3) 针对栗木矿区、珊瑚矿区及大厂矿区各类地球物理方法异常特征,为进一步深边部及外围找矿勘查工作提供了区分矿与非矿地球物理异常特征示范,也为危机矿山深边部找矿提供了立体找矿方法示范。

4) 就锡铁山铅锌矿深边部找矿而言,因矿区有以下特点:(a)因矿山为生产矿山,工业游散电流干扰较强;(b)工作环境较恶劣:海拔3 200~3 400 m、地形切割剧烈、岩石裸露无任何植被、极为干旱等,给物探工作带来困难;(c)地质条件复杂:断裂构造非常发育、矿区含矿岩系中石墨

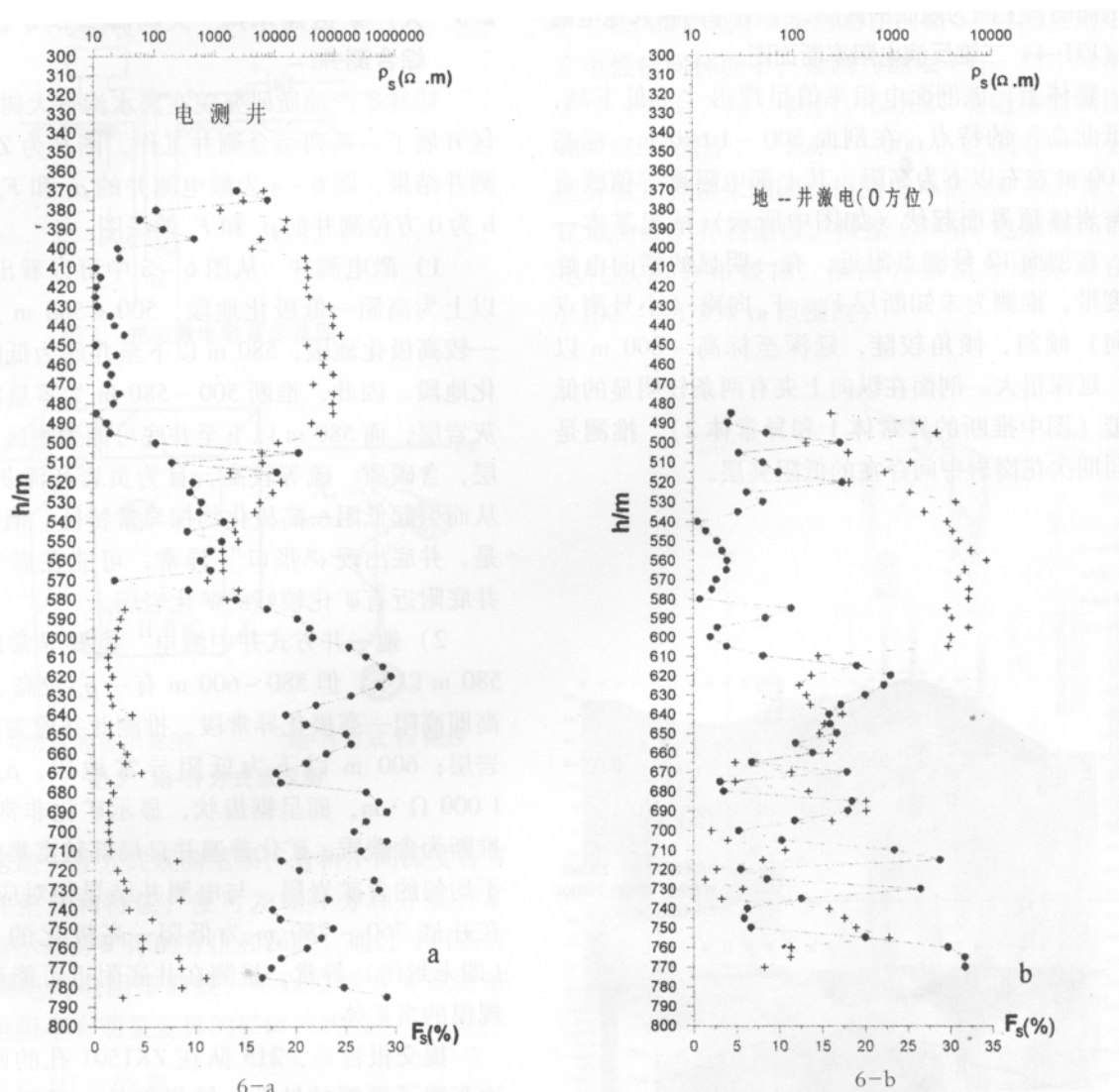


图 6 ZK1501 孔激电测井与地-井方式 0 方位井中激电 ρ_s 与 F_s 曲线图

化片岩、黄铁矿化碳质绿泥片岩等引起较强的非矿干扰异常，对物探结果的解译带来困难。因此建议在锡铁山铅锌矿区深边部找矿，在矿区应以 CSAMT 为主，外围可以考虑结合 EH-4 大地电磁法，以 TEM 为辅；有深部工程时可以结合地下物探方法进行综合解释。

参考文献：

- [1] 敬荣中. 新世纪勘查地球物理发展及我院勘查地球物理发展对策思路 [J]. 矿产与地质, 2001, 15 (2): 73-76.
- [2] 李如满, 汪树栋. 锡铁山铅锌矿地质特征、矿床成因及找矿标志 [J]. 矿产与地质, 2003, 17 (3): 218-221.
- [3] 刘国兴, 等. 大功率激电和瞬变电磁法在青海锡铁山深部找矿中的应用 [J]. 吉林大学学报 (自然科学版), 2003, 33 (4): 551-554.
- [4] 柳建新, 等. CSAMT 在青海锡铁山隐伏铅锌矿中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2008, 5 (3): 274-278.
- [5] 牛之琰. 时间域电磁法原理 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992.
- [6] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [7] 桂林矿产地质研究院、桂林工学院, 等. “十五”国家科技攻关项目《大型锡矿山接替资源探查技术与示范》研究报告 [R]. 桂林矿产地质研究院档案室, 2006.
- [8] 何继善, 等译. 可控源音频大地电磁法 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990.
- [9] 付良魁. 电法勘探教程 [M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- [10] 敬荣中, 鲍光淑, 周屹. 坑道综合物探方法在生产矿山中的应用 [J]. 中南工业大学学报, 2000, 31 (1): 4-8.
- [11] 黄俊革, 鲍光淑, 阮百尧. 坑道直流电阻率测深异常研究 [J]. 地球物理学报, 2003, 48 (1): 222-228.